

УДК 621.584+625.75

Исследование прочностных свойств и структуры ледовых материалов, модифицированных поливиниловым спиртом

Д-р техн. наук Г. Ю. ГОНЧАРОВА^{1*}, Д. О. ТУРАЛИН¹,
канд. техн. наук Г. В. БОРЩЕВ², С. С. БОРЗОВ²

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

²Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности (ВНИИХ) — филиал
ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН

*E-mail: galinagoncharova@mail.ru

Исследованы прочностные характеристики ледовых материалов с добавлением поливинилового спирта (ПВС) в широком диапазоне массовых концентраций (от 0,001 до 3,0%). Получена экспериментальная зависимость прочности льда при изгибе от концентрации ПВС в замораживаемом растворе. Определены диапазоны концентраций ПВС, различающиеся интенсивностью возрастания прочности с увеличением концентрации, подобраны аппроксимационные зависимости для расчета. На основании результатов проведенного микроскопического исследования структуры сублимированных ледовых образцов с добавлением ПВС выявлены закономерности формирования армирующей полимерной структуры в ледовой матрице. Показана взаимосвязь характеристик образуемого полимерного каркаса с прочностными свойствами льдокомпозиата для различных диапазонов концентрации ПВС. Обнаружен эффект упрочнения льда с внесением следовых концентраций ПВС. Показано, что уже при содержании ПВС 10 ppm (0,001%) образуется упорядоченная надмолекулярная структура, способствующая существенному (до 2 раз) упрочнению ледовой матрицы. Обоснована целесообразность применения существенно более низких концентраций ПВС относительно известных рецептур, используемых при изготовлении упрочненного льда для создания протяженных ледовых объектов сезонной дорожной инфраструктуры в Арктической зоне РФ.

Ключевые слова: лед, прочностные характеристики, модифицирование, ледовые переправы, автозимники, поливиниловый спирт, льдокомпозиаты, арктические материалы.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 15.09.2025, одобрена после рецензирования 01.10.2025, принята к печати 02.10.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-4-81-90

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Гончарова Г. Ю., Туралин Д. О., Борщев Г. В., Борзов С. С. Исследование прочностных свойств и структуры ледовых материалов, модифицированных поливиниловым спиртом. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 4. С. 81–90. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-4-81-90

Strength properties and structure of ice materials modified with polyvinyl alcohol

D. Sc. G. Yu. GONCHAROVA^{1*}, D. O. TURALIN¹, Ph. D. G. V. BORSHCHEV³, S. S. BORZOV²

¹Bauman Moscow State Technical University

²All-Russian Research Institute of Refrigeration Industry (VNIHII) — branch of the Federal Research Center for Food Systems named after V. M. Gorbатов of the Russian Academy of Sciences

*E-mail: galinagoncharova@mail.ru

The mechanical properties of ice materials with the addition of polyvinyl alcohol (PVA) across a wide range of mass concentrations (from 0.001 to 3.0%) were investigated. The dependence of flexural strength on PVA concentration in the freezing solution was established. Concentration ranges exhibiting different rates of strength increase with rising PVA content were identified, and approximation functions were developed for predictive purposes. Microscopic analysis of sublimated ice samples with PVA addition revealed patterns in the formation of reinforcing polymer structures within the ice matrix. The relationship between the characteristics of the formed polymer scaffold and the mechanical properties of the ice composite was demonstrated for various PVA concentration ranges. The strengthening effect of trace concentrations

of PVA was discovered, showing that even at 10 ppm (0,001 %) an ordered supramolecular structure forms, significantly enhancing the ice matrix's strength (up to 2 times). The feasibility of using substantially lower PVA concentrations compared to known formulations for producing reinforced ice was justified for creating extended ice structures for seasonal road infrastructure in the Arctic zone of Russia.

Keywords: ice, strength characteristics, modification, ice crossings, winter roads, polyvinyl alcohol, ice composites, arctic materials.

Article info:

Received 15/09/2025, approved after reviewing 01/10/2025, accepted 02/10/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-4-81-90

Article in Russian

For citation:

Goncharova G. Yu., Turalin D. O., Borshchev G. V., Borzov S. S. Strength properties and structure of ice materials modified with polyvinyl alcohol. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 4. p. 81–90. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-4-81-90

Введение

В России, располагающей огромными арктическими территориями, использование естественного льда для строительства различных хозяйственных построек, холодильников, укрепления сезонных автодорог и ледовых переправ имеет богатую историю. Еще во времена восстания И. И. Болотникова естественный лед использовался для создания фортификационных сооружений, а в годы Великой Отечественной войны — для укрепления танковой брони и в качестве основного материала ледовых переправ, взлетно-посадочных полос, в том числе Дороги жизни зимой 1942 г. В настоящее время в силу короткого периода навигации по северным рекам и высокой стоимости авиaperевозок необходимость создания сезонных автодорог и переправ в северных регионах РФ не отпадает, а наоборот, приобретает все большую актуальность в процессе более масштабного освоения арктического региона [1]–[4].

В арктической зоне сосредоточено наибольшее количество месторождений нефти, газа и других полезных ископаемых, и добывающие компании экономически заинтересованы в наиболее раннем открытии ледовых дорог и максимальном продлении периода их эксплуатации. К настоящему времени известны и достоверно экспериментально апробированы методы упрочнения ледовых структур, основанные на модификации ледовой матрицы, подтверждающие возможность увеличения предела прочности ледовых образцов до 2 раз при внесении микродоз полимерных добавок [5]–[7], до 6 раз — при совместном использовании модификаторов и армирования волокнистыми материалами [8]. Однако, несмотря на результаты экспериментальных исследований, ни один из этих методов упрочнения льда в полной мере не нашел широкого применения на сезонных дорогах арктического региона.

В то же время применение модификации льда на вездущих спортивных объектах как в России, так и за рубежом уже давно является освоенным и активно применяемым инструментом упрочнения и увеличения скользящих свойств ледовых покрытий [9]–[11]. В настоящей статье проанализированы причины, препятствующие широкому внедрению разработанных ледовых технологий в практику строительства и эксплуатации ледовых дорог арктического региона РФ и предложены пути их устранения.

Основные проблемы внедрения научно-обоснованных технологий упрочнения льда в арктических условиях

Физический механизм упрочнения и увеличения скользящих свойств льда на спортивных объектах основан на внесении в воду для заливки микродоз высокомолекулярных соединений в концентрациях от единиц до сотен ppm, которые в процессе кристаллизации дислоцируются преимущественно в межкристаллическом пространстве [12]. Это подтверждается изображениями модифицированных ледовых структур, полученными с помощью растрового криоэлектронного микроскопа. Элементный анализ различных зон изображений подтвердил локализацию внесенных соединений в межкристаллическом пространстве и полное их отсутствие непосредственно в кристаллах льда. При скольжении конька эта жидкостная субстанция выступает в роли дополнительной смазки, снижая сопротивление скольжению, а при действии ударной разрушающей нагрузки — в качестве демпфирующей составляющей и «залечивающей» возникающие травмы льда и выбоины [13, 14].

Для ледовых переправ и автозимников предложено использовать иной физический механизм воздействия на несущую способность ледовых покрытий, обеспечивающий сопротивление как циклическим (от колес автотранспорта), так и статическим нагрузкам. Анализ научных работ Арктического и антарктического НИИ, Крыловского государственного научного центра, Всероссийского НИИ гидротехники им. Веленеева и др. [15]–[18], показал, что прочность льда при сжатии и трехточечном изгибе может быть кратно увеличена в результате использования для заливки льда ряда водорастворимых полимерных соединений, таких как поливиниловый спирт (ПВС), различных видов крахмалов и пищевых добавок. При этом рекомендуемый диапазон их концентраций значительно превышает микродозы, вносимые в спортивные ледовые покрытия, и составлял от 8 до 12 % [19]–[22]. Учитывая масштабы и протяженность автозимников и ледовых переправ, внесение модифицирующих соединений в таких концентрациях приводило бы к существенному удорожанию, сопоставимому с экономическим эффектом, связанным с продлением сроков эксплуатации сезонных дорог. Тем не менее, активное освоение Арктики и развитие этих

регионов выводят задачи продления сроков эксплуатации сезонных дорог и поддержания непрерывности холодильной цепи при доставке пищевых продуктов населению и сезонным работникам принципиально на новый уровень.

Цель настоящей работы является исследование физического механизма упрочнения льда при внесении ПВС и визуализация полученных модифицированных ледовых структур для определения возможности существенного снижения концентраций полимера.

Впервые идея внесения водорастворимых соединений в воду для заливки льда с целью улучшения его физико-механических свойств представлена в работе [16]. Обнаружено, что увеличение предела прочности пресноводного льда при изгибе вызывает внесение в замораживаемый раствор не только волокнистых материалов, но и крахмала. В исследовании [17] получены экспериментальные данные, подтверждающие возможность улучшения прочностных свойств льда при добавлении различных видов крахмалов, желатина и ПВС. Так, при заливке раствора с добавлением 4% (по массе) картофельного крахмала наблюдали повышение прочности льда при одноосном сжатии в 2,4 раза, относительно пресного льда без добавок. Исследование прочностных свойств льда, модифицированного раствором ПВС, также показало повышение относительной мгновенной прочности до тех же значений при достижении диапазона концентраций 3–5%. Согласно этим исследованиям, наиболее интенсивное, близкое к линейному, возрастание прочности наблюдалось при повышении концентрации ПВС до 1%, после чего темп упрочнения существенно снижался и зависимость выходила практически на плато.

Упрочняющее влияние при внесении в лед водорастворимых полимерных соединений авторы работы [17] связывали с образованием внутри хрупкого льда протяженных полимерных цепей, формирующих по мере возрастания концентрации ПВС непрерывную пространственную полимерную сетку.

Технология упрочнения льда ориентирована на формирование протяженных сезонных автодорог и ледовых перепадов в арктическом регионе РФ, сравнительно высокие рекомендованные концентрации до настоящего времени препятствуют ее широкому внедрению в силу значительного удорожания работ по их созданию. При этом данных о прочностных характеристиках льда с добавлением ПВС в зоне малых и сверхмалых (следовых) концентраций практически не представлено в открытых источниках, так же как и достоверных сведений о формировании и изменении объемной пространственной полимерной структуры, образующейся во льду в данном диапазоне концентраций.

Авторами настоящей статьи проведены экспериментальные исследования прочности при изгибе $\sigma_{из}$ модифицированных ледовых образцов с малым шагом изменения концентрации ПВС $\xi_{ПВС}$ в зоне до 3% для определения граничной концентрации, соответствующей завершению устойчивого роста прочности, снижению его темпа и достижению уровня плато зависимости $\sigma_{из} = f(\xi_{ПВС})$.

Материалы и методы исследования

Прочностные свойства модифицированных ледовых образцов исследовали по методике испытаний на трехточ-

ечный изгиб. Для обеспечения корректности сравнения данных с результатами предыдущих исследований использовали образцы с геометрическими соотношениями, соответствующими методическим рекомендациям МАГИ (Международная ассоциация гидравлических исследований) и ИТТС (Международный комитет опытовых бассейнов) — мировой ассоциации организаций, выполняющих экспериментальные исследования в области гидродинамики [23]. Ледовые образцы представляли собой изделия в форме прямоугольного параллелепипеда с плоскими гранями и следующими габаритами: длина — 188 мм; ширина — 50 мм; высота — 20 мм. Для каждой концентрации заливаемого раствора изготавливали по 10 ледовых образцов. С помощью системы дозирования проводили автоматизированную послойную заливку приготовленных растворов в силиконовые формы и их замораживание в камере при температуре воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Толщина разливаемого слоя составляла 4 мм. После завершения намораживания ледовые образцы выдерживали в течение 12 ч в формах, а затем извлекали. Линейные размеры образцов измеряли штангенциркулем ШЦ-I ГОСТ 166–89.

Испытания проводили на силовой сервомеханической установке, оснащенной высокоскоростным шаговым серводвигателем, динамометром с выносным тензометрическим датчиком для измерения силы нагружения, датчиком перемещения, сервоусилителем и пультом управления двигателем установки. Установку размещали в холодильной камере, прочностные испытания проводили при температуре минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Расстояние между опорами составляло 125 мм, скорость нагружения подвижным пуансоном — 0,5 мм/с. Измерительная аппаратура фиксировала величину нагрузок и перемещение пуансона. В процессе обработки экспериментальных данных проводили расчет напряжений образца при трехточечном изгибе по формуле:

$$\sigma_{из} = \frac{3F \cdot l}{2b \cdot h^2}, \quad (1)$$

где $\sigma_{из}$ — напряжение образца при изгибе, МПа; F — нагрузка, прикладываемая к образцу пуансоном, Н; l — расстояние между опорами, мм; b — ширина образца, мм; h — толщина образца, мм.

Для каждой партии образцов, соответствующей определенной концентрации раствора, рассчитывали среднее значение прочности льда при изгибе, доверительный интервал вычисляли с использованием t -распределения Стьюдента для уровня доверия 95%.

Для визуализации структуры полимерных образований внутри модифицированных ледовых образцов осуществляли их сублимационное обезвоживание в вакуумной камере при остаточном давлении 400 Па. Последующее микроскопическое исследование полученных структур проводили на стереоскопическом тринкулярном микроскопе MAGUS Stereo 7T с оптической схемой Грену, увеличением до $\times 45$ и цифровой камерой MAGUS CDF30.

Результаты и обсуждение

Результаты прочностных испытаний ледовых образцов на трехточечный изгиб в диапазоне концентраций

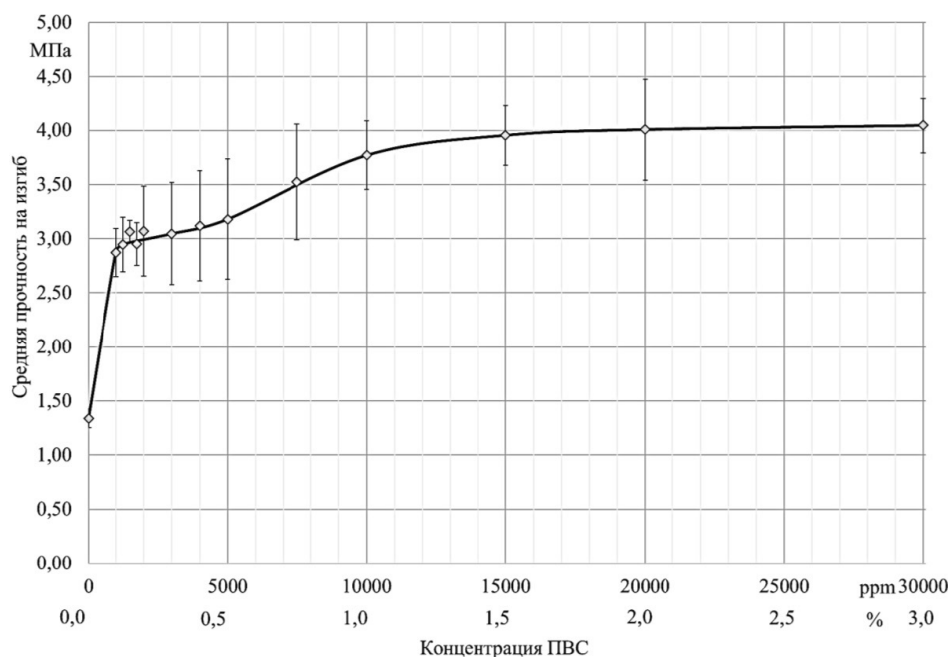


Рис. 1. Средняя прочность при изгибе ледовых образцов с добавлением ПВС в концентрациях от 1000 до 30000 ppm

Fig. 1. Average flexural strength of ice samples with PVA added in concentrations ranging from 1000 to 30000 ppm

ПВС от 1000 до 30000 ppm (от 0,1 до 3,0%) представлены на рис. 1.

Полученные результаты, с одной стороны, подтверждают возможность существенного (до 3 раз) увеличения предела прочности ледовых образцов, модифицированных раствором ПВС. С другой стороны, можно видеть, что наиболее существенный рост прочности происходит в зоне малых концентраций ПВС, а в достаточно изученном и рекомендованном для создания упрочненных ледовых структур диапазоне концентраций от 10000 ppm (1%) кривая $\sigma_{\text{и}} = f(\xi_{\text{ПВС}})$ практически «вырождается» и приближается к зоне автомодельности от параметра $\xi_{\text{ПВС}}$. Полученные результаты ставят под сомнение целесообразность использования рекомендуемых в открытых источниках концентраций ПВС, превышающих 1% [18]–[21], в особенности в целях упрочнения линейных сооружений протяженной транспортной инфраструктуры.

Однако в каждой проведенной серии экспериментов, точки в зоне сверхмалых (следовых) значений концентрации ПВС стабильно «выпадали» из общего тренда и существенно превышали значения, ожидаемые исходя из предположения о линейном характере начального участка кривой $\sigma_{\text{и}} = f(\xi_{\text{ПВС}})$. Это позволило выдвинуть гипотезу о том, что наиболее кардинальные изменения структуры и, соответственно, механических свойств модифицированного льда происходят в зоне концентраций, существенно меньших 1000 ppm (0,1%).

В соответствии с этим проведены исследования прочностных свойств ледовых образцов в зоне концентраций ПВС от 10 до 1000 ppm с шагами 10 ppm (до значения 100 ppm), 50 ppm (до 200 ppm) и 100 ppm (до 1000 ppm). Результаты серии экспериментов представлены на рис. 2.

Важнейшим результатом проведенных прочностных испытаний ледовых образцов является то, что эффект

упрочнения проявился уже при внесении микроконцентраций ПВС. Внесение всего лишь 10 ppm (0,001%) ПВС в замораживаемый раствор повысило среднюю прочность полученного льда при изгибе до 2,27 МПа, что в 1,7 раза больше средней прочности льда из дистиллированной воды (1,34 МПа). Таким образом, можно говорить о наличии эффекта упрочнения модифицированного льда уже в зоне следовых концентраций ПВС, что подтверждается визуальной идентификацией структурной перестройки льда.

После сублимационного обезвоживания ледовых образцов в вакуумной камере получены микроскопические изображения образованных в них полимерных структур. Уже при концентрации 10 ppm (0,001%) по всей площади обезвоженного ледового образца наблюдается равномерно распределенная полимерная структура (рис. 3), представляющая собой совокупность переплетенных фибрилл диаметром до 30 мкм, которая, по-видимому, способствует снижению хрупкости и замедлению динамики разрушения при действии изгибающей нагрузки. Следует отметить, что столь низкой концентрации полимера соответствует высокий уровень надмолекулярной организации полимера — единичные фибриллы не располагаются хаотично, а образуют пространственную структуру. Предположительно, именно это обстоятельство объясняет наличие значительного эффекта упрочнения ледовых образцов при добавлении следовых концентраций ПВС.

С дальнейшим повышением концентрации ПВС плотность заполнения ледового образца полимерными фибриллами постепенно увеличивается (рис. 4), возрастает и характерный размер единичных фибрилл (до 50 мкм при концентрации ПВС 150 ppm). С этим связано и увеличение прочности льда до 2 раз относительно льда

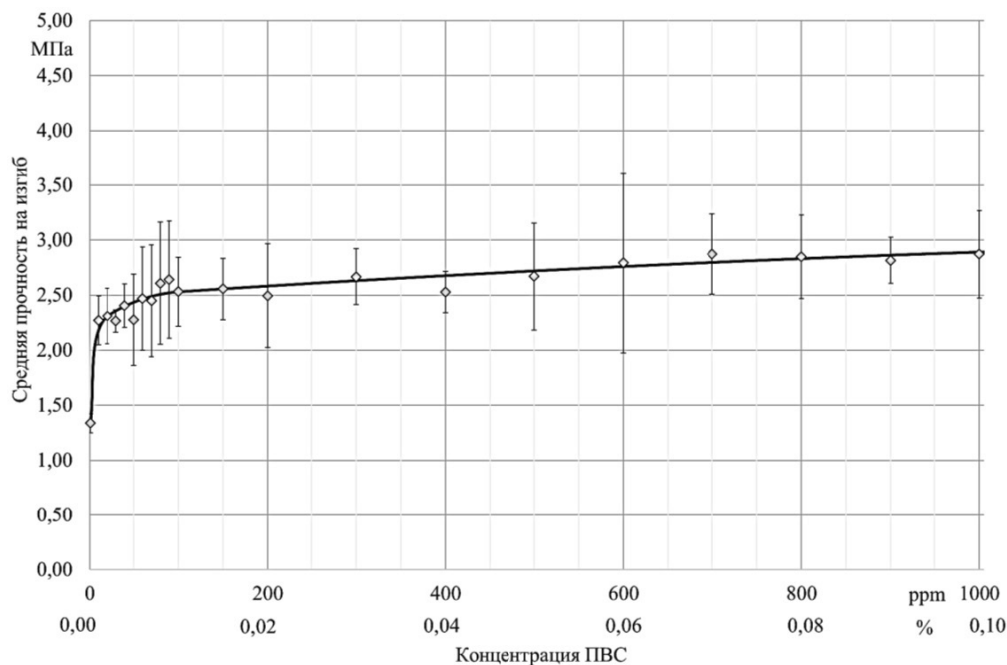


Рис. 2. Средняя прочность при изгибе ледовых образцов с добавлением ПВС в концентрациях от 10 до 1000 ppm
Fig. 2. Average flexural strength of ice samples with PVA added in concentrations ranging from 10 to 1000 ppm

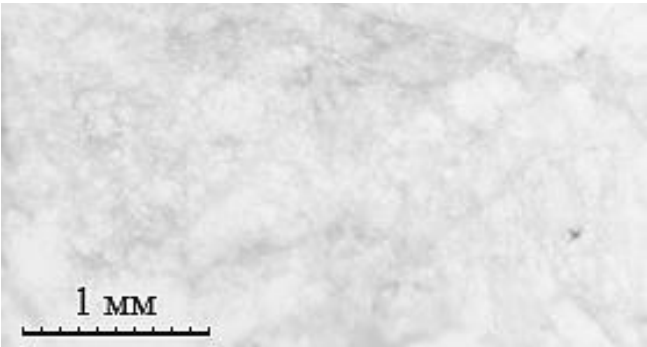


Рис. 3. Структура обезвоженного образца льда, содержащего 10 ppm ПВС
Fig. 3. Structure of a dehydrated ice sample containing 10 ppm PVA

из дистиллированной воды при повышении концентрации ПВС до 150 ppm (0,015 %).

При достижении концентрации 500 ppm отдельные фибриллы уже сливаются в более плотные образования, которые по аналогии с кровеносными сосудами могут восприниматься как «артерии». Диаметр уплотненных фибриллярных элементов достигает 250 мкм. В структуре образца, содержащего 1000 ppm (0,1 %) ПВС, все визуализируемое пространство равномерно разделено на отдельные ячейки сетью плотных протяжённых «артерий» и «капилляров» (рис. 5).

При концентрациях 2000–2500 ppm начинает проявляться уже направленная ориентация уплотненных элементов, по-видимому, коррелирующая с направлением движения фронта кристаллизации при формировании ледового образца и сохраненная после его сублимацион-

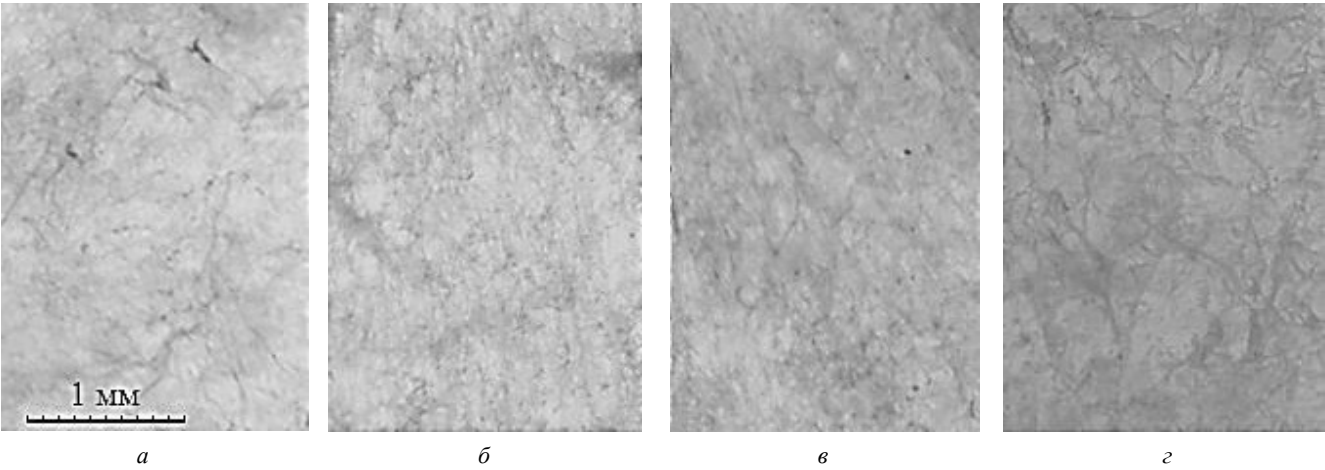
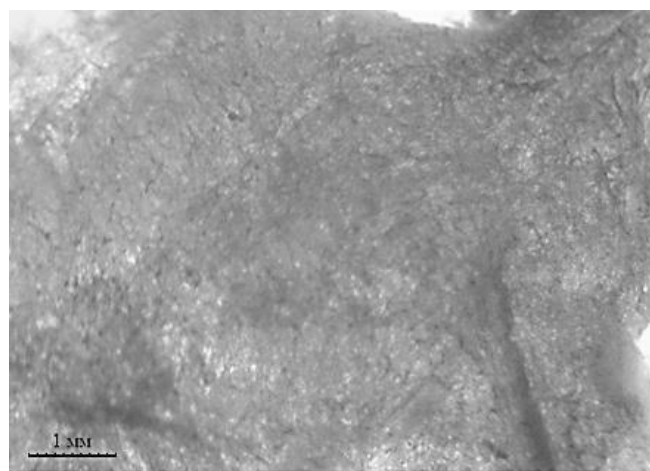
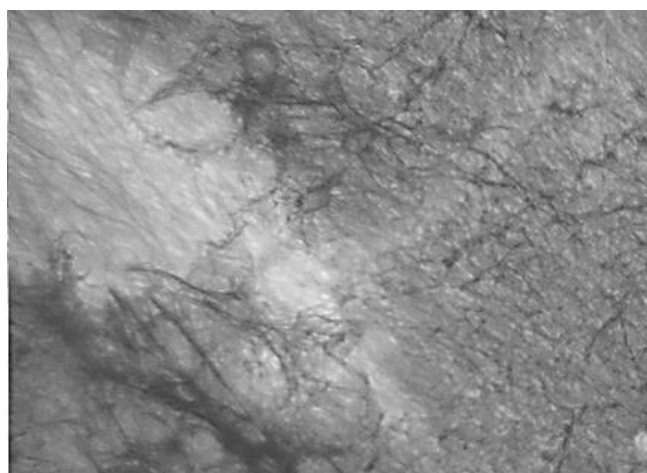


Рис. 4. Структуры обезвоженных образцов льда, содержащих 50 (а), 70 (б), 100 (в) и 150 ppm ПВС (г)
Fig. 4. Structures of dehydrated ice samples containing 50 (a), 70 (б), 100 (в), and 150 ppm PVA



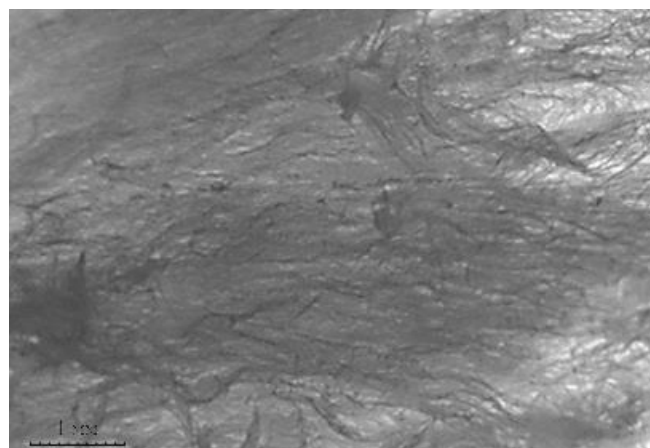
а



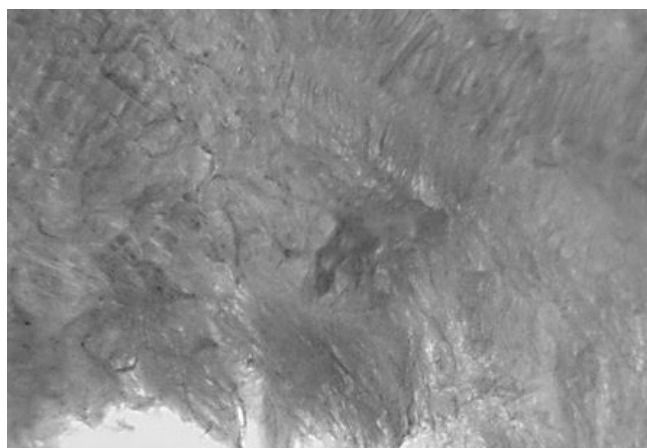
б

Рис. 5. Структуры обезвоженных образцов льда, содержащих 500 (а) и 1000 ppm ПВС (б)

Fig. 5. Structures of dehydrated ice samples containing 500 (a) and 1000 (б) ppm PVA



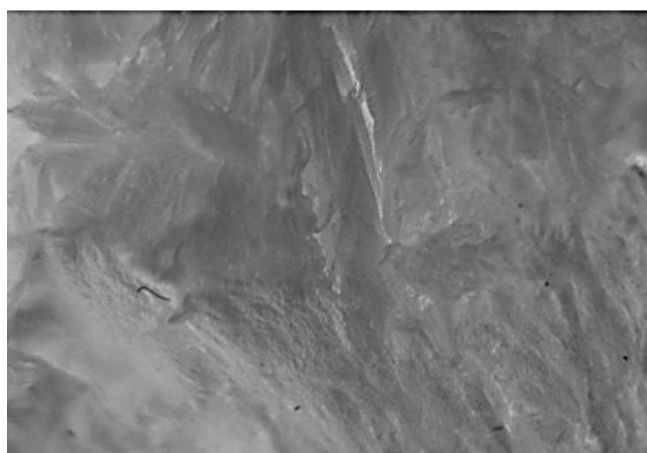
а



б



в



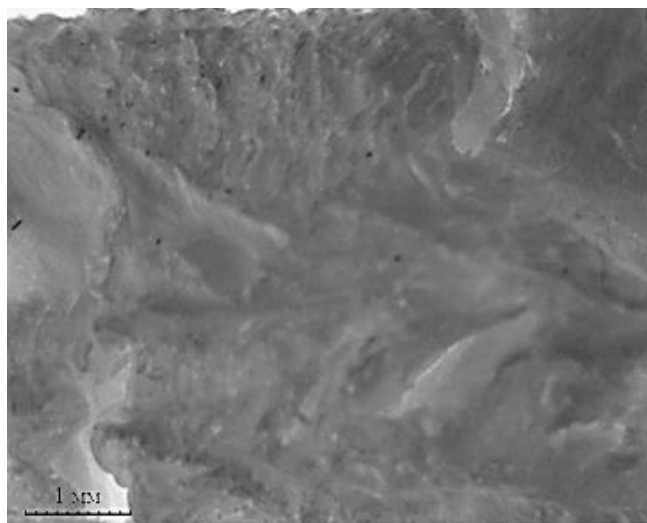
г

Рис. 6. Структуры обезвоженных образцов льда, содержащих 2000 (а), 2500 (б), 5000 (в) и 7500 ppm ПВС (г)

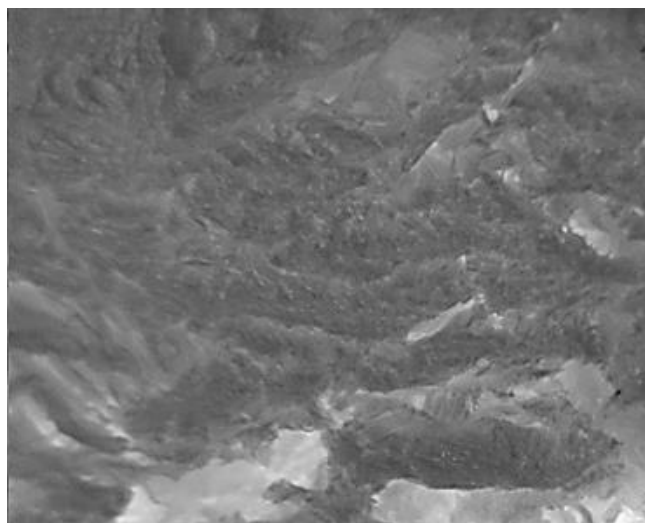
Fig. 6. Structures of dehydrated ice samples containing 2000 (a), 2500 (б), 5000 (в), and 7500 (г) ppm PVA

ного обезвоживания (рис. 6, а, б). В интервале концентраций 5000–7500 ppm полимерная структура представляет собой сплетение сплошных столбчатых образований, сохраняющее свою плотность и прочность даже в обезвоженном состоянии (рис. 6, в, г).

Начиная с концентрации 10000 ppm (1%) структура выглядит как сплошной спеченный массив, сохраняющий объем, прочность которого определяется каркасом плотных жилообразных образований (рис. 7). С дальнейшим возрастанием концентрации ПВС закономерно увеличи-



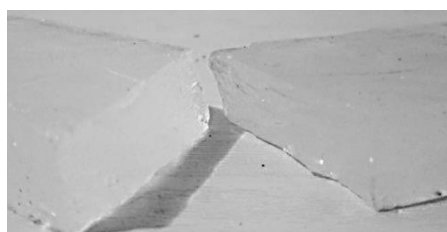
а



б

Рис. 7. Структуры обезвоженных образцов льда, содержащих 10000 (а) и 20000 ppm ПВС (б)

Fig. 7. Structures of dehydrated ice samples containing 10000 (a) и 20000 (б) ppm PVA



а



б



в

Рис. 8. Внешний вид разрушенных ледовых образцов из дистиллированной воды (а) и с добавлением 0,2 (б) и 1,0% ПВС (в)

Fig. 8. Destroyed ice samples made from distilled water (a) and with the addition of 0.2 (б) and 1.0 (в) % PVA

ваются плотность образований и объемная заполненность матрицы без значительных изменений характера организации надмолекулярной структуры и прочностных свойств.

В отличие от хрупкого разрушения ледовых образцов из дистиллированной воды и с добавлением небольших концентраций ПВС, разрушение ледовых образцов в зоне высоких концентраций (более 1%) приобретает достаточно выраженный вязкостный характер, и изменения физико-механических характеристик ледового композиционного материала при дальнейшем увеличении концентрации ПВС выражаются преимущественно в проявлении пластических свойств, а не в повышении несущей способности (рис. 8).

Анализ полученных результатов прочностных испытаний и микроскопических исследований позволяет условно выделить четыре зоны на графике зависимости прочности льда от концентрации ПВС (рис. 9).

Максимальный темп роста прочности льда с повышением содержания ПВС достигается при следовых концентрациях — до 10 ppm, что соответствует зоне I (0–10 ppm). Добавление ПВС в микродозах приводит к разрастанию цепей полимера в межкристаллическом пространстве, образованию фибриллярной структуры и формированию каркаса в ледовой матрице. Такое критическое изменение характера внутренней структуры ледового

материала значительно улучшает его прочностные свойства при изгибе.

После формирования пространственной сетки повышение прочности льдокомпозиата с увеличением концентрации ПВС связано как с укреплением и утолщени-

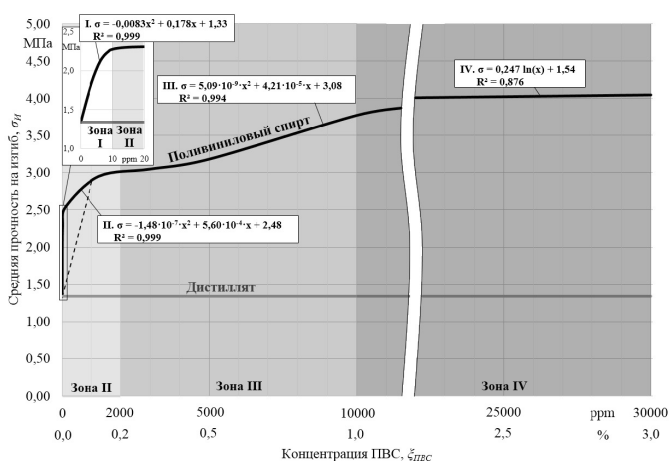


Рис. 9. Зависимость прочности льда при изгибе от концентрации ПВС в замораживаемом растворе

Fig. 9. Dependence of flexural strength of ice on the concentration of PVA in the freezing solution

ем элементарных полимерных фибрилл и повышением плотности заполнения ими ледовой матрицы, так и с образованием уплотненных звеньев структуры («артерий») из одиночных фибрилл («капилляров»). Описанным изменениям структуры соответствует интенсивный рост прочности льда при изгибе с увеличением концентрации ПВС, происходящий в зоне II (10–2000 ppm).

При достижении концентрации ПВС ~2000 ppm увеличение прочности льда замедляется. Объем ледовой матрицы уже насыщен полимерной сеткой, и дальнейшее упрочнение льда связано с формированием анизотропных волокнистых образований из агломератов фибрилл, ориентируемых параллельно фронту кристаллизации, и постепенным объемным заполнением ими ледовой матрицы — зона III (2000–10000 ppm).

При достижении значений 10000 ppm (1%) дальнейшее увеличение концентрации ПВС приводит к существенному снижению темпа роста предела прочности и выходу в зону плато — зона IV. При замораживании растворов ПВС указанных концентраций происходит криоструктурирование устойчивого полимерного криогеля, сохраняющего структуру и в оттаявшем состоянии [24]–[27].

Исследования криогелей, полученных лиофильной сушкой замерзших растворов ПВС высоких (до 10%) концентраций, демонстрируют возможность создания прочных полимерных каркасов различной структуры и управления ее характеристиками за счет изменения скорости замерзания, направления движения фронта кристаллизации, растворителя, молекулярной массы и концентрации полимера и т. д. [24]–[27]. Однако в контексте упрочнения протяженных дорожных объектов наибольшее значение имеют полученные в настоящем исследовании результаты, подтверждающие выстраивание целостного объемного полимерного каркаса уже при микроконцентрациях ПВС.

Укрепление поверхности автозимников и ледовых переправ проводится комбинированными дорожными машинами с подогреваемыми автоцистернами, осуществляющими проливку дорожного покрытия водой, забираемой из водоемов. Благодаря водорастворимости ПВС возможно добавлять его в проливочные цистерны в виде концентрированного раствора, в результате на поверхность дороги наносится разбавленный раствор ПВС в концентрациях, достаточных для упрочнения ледового покрытия.

Заключение

Проведение прочностных испытаний льдокомпозиций и анализ микроскопических изображений обезвоженных ледовых образцов позволили выдвинуть и проверить гипотезу о взаимосвязи динамики изменения прочностных свойств модифицированного льда с геометрией, плотностью и пространственной ориентацией образованной в них полимерной структуры. При этом подтверждено, что перечисленные характеристики полимерных структур напрямую связаны с концентрацией ПВС, используемой при их намораживании.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Характерная, равномерно распределенная по объему полимерная структура образуется в ледовом образце уже при внесении микроконцентраций ПВС (~10 ppm).

2. После формирования полимерной структуры наиболее интенсивное упрочнение льда (до 2 раз) происходит в диапазоне концентраций до 50–100 ppm, затем темп роста прочностных характеристик резко снижается, асимптотически приближаясь к зоне плато после достижения концентрации ПВС 1–2%.

3. Экспериментально полученные графики позволяют разделить кривую, описывающую зависимость $\sigma_{II} = f(\xi_{ПВС})$, на несколько характерных участков и аппроксимировать ее внутри них соответствующими полиномиальными функциями, позволяющими рассчитывать предел прочности при изгибе модифицированных ПВС ледовых образцов.

4. Результаты проведенных прочностных испытаний позволяют ограничить зону рекомендуемых для использования в строительстве сезонных автодорог концентраций ПВС значением 0,2% (2000 ppm).

5. Проведенное исследование открывает принципиально новые перспективы практического применения технологии модификации льда в арктических регионах РФ, так как полученные результаты подтверждают возможность снижения уровня рекомендуемых концентраций ПВС, обеспечивающих требуемое упрочнение льда (практически на два порядка), и, соответственно, экономических затрат на их реализацию.

Литература/References

1. Kiani S. et al. Effects of recent temperature variability and warming on the Oulu-Hailuoto ice road season in the northern Baltic Sea. *Cold Regions Science and Technology*. 2018. Vol. 151 (4). P. 1–8. DOI: 10.1016/j.coldregions. 2018.02.010
2. Barrette P. D., Charlebois L., Butt B. Reinforcement of ice covers for transportation: Material investigation and preliminary laboratory testing. National Research Council Canada, Conseil national de recherches. Canada, 2019. 64 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.33892.40322
3. Vasiliev N. K. et al. A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2015. Vol. 115. P. 56–63. DOI: 10.1016/j.coldregions. 2015.03.006
4. Buznik V. M., Kablov E. N. Arctic materials science: Current state and prospects. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2017. Vol. 87 (5). P. 397–408. DOI: 10.1134/S101933161705001X
5. Goncharova G. Yu. et al. A New Method of Strengthening of Ice Blocks Formed under Conditions of Natural Cold. *Russian Journal of General Chemistry*. 2021. Vol. 91 (S1). P. S34–S40. DOI: 10.1134/S1070363221130351
6. Разомасов Н. Д. Исследование влияния холодильно-технологических режимов намораживания на физико-механические свойства водного льда: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.03. М., 2022. 154 с. [Razomasov N. D. Study of the influence of refrigeration and freezing technological modes on the physical and mechanical properties of water ice: dis.... Candidate of Technical Sciences: 05.04.03. Moscow, 2022. 154 p. (in Russian)]
7. Goncharova G. Yu., Razomasov N. D., Borschev G. V., Buznik V. M. Chemically modifying ice and ice-based materials to control their properties. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021. Vol. 55 (5). P. 1045–1055. DOI: 10.1134/S0040579521050055

8. Buznik V. M. et al. Strengthening of ice with basalt materials. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 196. P. 103490. DOI: 10.1016/j.coldregions. 2022.103490
9. Способ получения искусственного льда: патент 2310142 Рос. Федерация: МПК F25C 3/02, E01C 13/10 / Б. А. Кузнецов, Г. Ю. Гончарова, В. Н. Маслаков, М. В. Загайнов, В. Е. Ларионов, Н. Н. Калущких № 2006139672/12; заявл. 09.11.2006; опубл. 10.11.2007, Бюл. № 5. 5 с. [Method of production of the artificial ice: patent 2310142 Rus. Federation: IPC F25C 3/02, E01C 13/10 / B. A. Kuznetsov, G. Yu. Goncharova, V. N. Maslakov, M. V. Zagainov, V. E. Larionov, N. N. Kalutskikh № 2006139672/12; appl. 09.11.2006; publ. 10.11.2007, Bul. no 5. 5 p. (in Russian)]
10. Способ получения многослойного ледового покрытия для хоккея: патент 2364807 Рос. Федерация: МПК F25C 3/02, C09K 3/24 / Г. Ю. Гончарова, М. В. Загайнов, Н. Н. Калущких, Б. А. Кузнецов № 2008127977/12; заявл. 10.07.2008; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23. 13 с. [Method of arranging multilayered ice cover for hockey: patent 2364807 Rus. Federation: IPC F25C 3/02, C09K 3/24 / G. Yu. Goncharova, M. V. Zagainov, N. N. Kalutskikh, B. A. Kuznetsov № 2008127977/12; appl. 10.07.2008; publ. 20.08.2009, Bul. no 23. 13 p. (in Russian)]
11. Способ получения скоростного льда с высокими скользящими, прочностными и оптическими свойствами для спортивных сооружений: патент 2386089 Рос. Федерация: МПК F25C 3/02, A63C 19/10 / Г. Ю. Гончарова, Н. Н. Калущких, А. П. Осипова, Л. А. Лысенко, А. Е. Травкин, А. В. Петроградский, С. И. Нефедкин № 2009113028/12; заявл. 08.04.2009; опубл. 10.04.2010, Бюл. № 10. 5 с. [Method of obtaining high speed ice with good sliding, strength and optical properties for sports structures: patent 2386089 Rus. Federation: IPC F25C 3/02, A63C 19/10 / G. Yu. Goncharova, N. N. Kalutskikh, A. P. Osipova, L. A. Lysenko, A. E. Travkin, A. V. Petrogradsky, S. I. Nefedkin № 2009113028/12; appl. 08.04.2009; publ. 10.04.2010, Bul. № 10. 5 c. (in Russian)]
12. Архаров А. М., Гончарова Г. Ю. Экспериментальное исследование ледовых структур, модифицированных полимерами // Холодильная техника. 2010. № 11. С. 46–50. [Arkharov A. M., Goncharova G. Yu. Experimental study of ice structures modified by polymers. *Kholodilnaya Tekhnika*. 2010. № 11. P. 46–50. (in Russian)]
13. Архаров И. А., Гончарова Г. Ю., Прусова Ж. В. Исследование влияния модифицирующих присадок на структуру и свойства ледовых покрытий спортивного назначения // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. 2012. № 5 (5). С. 19. [Arkharov I. A., Goncharova G. Yu., Prusova Zh. V. Study of the influence of modifying additives on the structure and properties of ice surfaces for sports purposes. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University*. 2012. no 5 (5). P. 19. (in Russian)]
14. Гончарова Г. Ю., Никифорова И. Г. Новые возможности снижения силы сопротивления скольжению в ледовых видах спорта // Холодильная техника. 2015. № 4. С. 25–28. [Goncharova G. Yu., Nikiforova I. G. New Possibilities of Reducing the Sliding Resistance Force in Ice Sports. *Kholodilnaya Tekhnika*. 2015. no 4. P. 25–28. (in Russian)]
15. Васильев Н. К. Исследования по упрочнению льда водорастворимыми высокомолекулярными соединениями // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1986. Т. 205. С. 45–48. [Vasiliev N. K. Research on ice strengthening by water-soluble high-molecular compounds. *Proceedings of the VNIIG*. 1986. Vol. 205. P. 45–48. (in Russian)]
16. Кобл Р. Л., Кингери У. Д. Искусственное упрочнение (армирование) льда // Лед и снег. М.: Мир. 1966. С. 94–116. [Coble R. L., Kingery W. D. Ice reinforcement. *Ice and Snow*. Moscow: Mir, 1966. P. 94–116. (in Russian)]
17. Разработка способов создания ледяных и грунтовых композиционных материалов повышенной прочности для строительства в районах Арктики и Антарктики: отчет о НИР / ПНИИИС, ААНИИ; рук. В. Г. Чеве́рев; исполн.: Б. А. Савельев, В. Е. Гагарин, А. В. Чумичев. М., 1989. 144 с. [Development of methods for creating high-strength ice and soil composite materials for construction in the Arctic and Antarctic regions: R&D report / PRIESC, AARI; superv. V. G. Cheverev; exec.: B. A. Savelyev, V. E. Gagarin, A. V. Chumichev Moscow, 1989. 144 p. (in Russian)]
18. Головин Ю. И. и др. Упрочнение льда совместным действием добавки поливинилового спирта и ультрадисперсных наночастиц диоксида кремния // Письма в ЖТФ. 2024. Т. 50 (2). С. 28–31. DOI: 10.61011/PJTF. 2024.02.56980.19669. [Golovin Yu. I. et al. Ice strengthening by the combined action of polyvinyl alcohol additive and ultrafine silicon dioxide nanoparticles // *Technical Physics Letters*. 2024. Vol. 50 (2). P. 28–31. (in Russian)]
19. Состав искусственного льда: а. с. 1242505 СССР: МПК C09K 3/24 / Н. К. Васильев, А. В. Панюшкин, С. М. Алейников; заявитель Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева № 3871674/23–26; заявл. 16.01.85; опубл. 07.07.86, Бюл. № 25. 2 с. [Manufactured ice composition: author certificate 1242505 USSR: IPC C09K 3/24 / N. K. Vasiliev, A. V. Panyushkin, S. M. Aleinikov; applicant B. E. Vedeneyev All-Union Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering № 3871674/23–26; appl. 16.01.85; publ. 07.07.86, Bul. № 25. 2 c. (in Russian)]
20. Способ создания ледяного покрытия на поверхности водоема: а. с. 1346921 СССР: МПК F25C 3/04 / Н. К. Васильев; заявитель Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева № 4001779/26–13; заявл. 06.01.86; опубл. 23.10.87, Бюл. № 39. 2 с. [Method of making ice coating on surface of water reservoir: author certificate 1346921 USSR: IPC F25C 3/04 / N. K. Vasiliev; applicant B. E. Vedeneyev All-Union Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering № 4001779/26–13; appl. 06.01.86; publ. 23.10.87, Bul. № 39. 2 c. (in Russian)]
21. Способ получения ледяного покрытия: а. с. 1483210 СССР: МПК F25C 1/12 / Н. К. Васильев, В. Н. Карнович, А. В. Панюшкин; заявители Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева и Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта им. В. Н. Образцова № 4239898/28–13; заявл. 04.05.87; опубл. 30.05.89, Бюл. № 20. 2 с. [Method of producing ice coat: author certificate 1483210 USSR: IPC F25C 1/12 / N. K. Vasiliev, V. N. Karnovich, A. V. Panyushkin; applicants B. E. Vedeneyev All-Union Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and V. N. Obratsov Leningrad Institute of Railway Engineers № 4239898/28–13; appl. 04.05.87; publ. 30.05.89, Bul. № 20. 2 c. (in Russian)]
22. Состав для искусственного льда: а. с. 1796650 СССР: МПК F25C 1/00, C09K 3/24 / Н. К. Васильев, Е. Л. Разговорова, И. Н. Шаталина, Ю. А. Иванов, В. Н. Харитонов; заявители Всесоюзный научно-исследовательский институт гидро-

- техники им. Б. Е. Веденеева № 4953155/04; заявл. 30.04.91; опубл. 23.02.93, Бюл. № 7. 3 с. [Composition for artificial ice: author certificate 1796650 USSR: IPC F25C 1/00, C09K 3/24 / N. K. Vasiliev, E. L. Razgovorova, I. N. Shatalina, Yu. A. Ivanov, V. N. Kharitonov; applicant B. E. Vedeneyev All-Union Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering № 4953155/04; appl. 30.04.91; publ. 23.02.93, Bul. № 7. 3 с. (in Russian)]
23. Test methods for model ice properties 7.5–02.04–02. International Towing Tank Conference (ITTC) Recommended Procedures and Guidelines. 2014. 19 p.
24. Лозинский В. И. Криогели на основе природных и синтетических полимеров: получение, свойства и области применения // Успехи химии. 2002. № 71. С. 559–585. [Lozinsky V. I. Cryogels based on natural and synthetic polymers: production, properties and areas of application. *Uspekhi khimii*. 2002. № 71. P. 559–585. (in Russian)]
25. Guimaraes Raul et al. Polyvinyl alcohol/multi-walled carbon nanotubes nanocomposites with ordered macroporous structures prepared by ice-templating. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021. Vol. 138 (7). P. 49837.
26. Sun M. et al. Fabrication and characterization of gelatin/polyvinyl alcohol composite scaffold. *Polymers*. 2022. Vol. 14 (7). P. 1400.
27. Deville S, Saiz E, Tomsia A. P. Ice-templated porous alumina structures. *Acta materialia*. 2007. Vol. 55 (6). P. 1965–1974.

Сведения об авторах

Гончарова Галина Юрьевна

Д. т. н., профессор кафедры Э4 «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1, galinagoncharova@mail.ru. Scopus ID: 57195304408. ORCID ID 0000-0003-4270-819X

Туралин Денис Олегович

Инженер НИИ Энергетического машиностроения, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1, denis.turalin@gmail.com

Борщев Георгий Владимирович

К. т. н., младший научный сотрудник лаборатории систем хладоснабжения и теплофизических измерений, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности (ВНИИХ) — филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, 127422, Москва, ул. Костякова, 12, razorleaf. 619@gmail.com

Борзов Сергей Сергеевич

Младший научный сотрудник лаборатории систем хладоснабжения и теплофизических измерений, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности (ВНИИХ) — филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, 127422, Москва, ул. Костякова, 12, dons@bk.ru

Information about authors

Goncharova Galina Yu.

D. Sc., Professor of Department E4 «Refrigeration, cryogenic equipment, air conditioning and life support systems», Bauman Moscow State Technical University, Russia, 105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya Str., Build. 5, Str. 1, galinagoncharova@mail.ru. Scopus ID: 57195304408. ORCID ID 0000-0003-4270-819X

Turalin Denis O.

Engineer, Research Institute of Power Engineering, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Russia, 105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya Str., Build. 5, Str. 1, denis.turalin@gmail.com

Borshchev Georgiy V.

Ph. D., Junior researcher, Laboratory of refrigeration systems and thermophysical measurements, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry branch of Federal Scientific Center for Food Systems named after V. M. Gorbato of the Russian Academy of Sciences (Federal State Budgetary Scientific Institution), Russia, 127422, Moscow, 12 Kostyakova Str., razorleaf. 619@gmail.com

Borzov Sergei S.

Junior researcher, Laboratory of refrigeration systems and thermophysical measurements, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry branch of Federal Scientific Center for Food Systems named after V. M. Gorbato of the Russian Academy of Sciences (Federal State Budgetary Scientific Institution), Russia, 127422, Moscow, 12 Kostyakova Str., dons@bk.ru



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»